第30卷 第8期 材料研究学报 Vol. 30 No. 8
2016年8月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH August 2016

Bi含量对Al-Bi偏晶合金显微组织演变的影响*

康智强[1] 杨 雪[1] 冯国会[1] 张 林[2]

1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院 沈阳 110168
2. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室 沈阳 110004

摘 要 结合数值模拟与实验研究了常规条件下Al-Bi偏晶合金难混溶区的凝固过程, 分析了Bi含量对Al-Bi偏晶合金显微组织演变的影响。结果表明, 成分为Al-10%Bi合金试样下部组织中富Bi液滴的平均直径和体积分数分别是成分为Al-5%Bi合金试样下部组织中富Bi液滴平均直径和体积分数的1.1倍和12.8倍, 且Al-10%Bi合金试样下部聚集了大量的大尺寸富Bi液滴, 其显微组织均匀性较差; 成分为Al-5%Bi的合金试样中富Bi液滴的平均尺寸较小, 显微组织较均匀; 偏晶点成分的Al-3.4%Bi偏晶合金显微组织中无大尺寸富Bi液滴生成, 显微组织均匀。分析表明, 富Bi相含量的增加导致液滴受重力作用增强, 加剧了难混溶区液-液相分离和分解的凝固行为, 增大了富Bi液滴的尺寸和数量, 液滴受到的Ostwald熟化和碰撞凝并的作用增强, 促使大量的大尺寸富Bi液滴聚集在试样下部, 加重了偏晶合金显微组织的宏观偏析。

关键词 金属材料, Al-Bi偏晶合金, 合金成分, 显微组织, 重力迁移

分类号 TG146, TB331 文章编号 1005-3093(2016)08-0603-06

Effect of Bi-Content on Microstructure Evolution of Al-Bi Monotectic Alloy

KANG Zhiqiang[1**] YANG Xue[1] FENG Guohui[1] ZHANG Lin[2]

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

2. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Material of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China

*Supported by National Nature Science Foundation of China No.51401133, Science and Technology Fund in Liaoning Province No.20141074, Scientific Research Projects in Liaoning Province Department of Education No. L2014230 and Shenyang Jianzhu University Discipline HanYu Project No. XKHY2-48.

Manuscript received April 24, 2016; in revised form May 14, 2016.

**To whom correspondence should be addressed, Tel:13840541633, E-mail: kangzhiqiang101915@163.com

ABSTRACT The effect of Bi-content on microstructure evolution of Al-Bi monotectic alloy and solidification progress ofmiscibility gap under the action of gravity was studied by air cooling to desired temperatures and thenquenching, as well as bynumerical simulation. The average diameter and volume fraction of Bi-rich droplets in Al-10%Bi monotectic alloy are 1.1 and 12.8 times of those in Al-5%Bi monotectic alloyrespectively. A huge amount of large-size drops rich inBi gather in the lower part of Al-10% Bialloywith low solidification uniformity.The average size of drops rich in Bi in the alloy of Al-5%Bi with a uniform solidification; There's no large-size drops rich in Bi in the solidifiedmonotecticalloy with Al-3.4%Bi, and its solidification is uniform.The analysis demonstrates that the increase of the amount of Bi-rich phase may enhance the gravity action on the drops, thereby aggravate the solidification process with separation and decomposition of liquid phasesin the immiscible area, and enlargethe size and number of drops rich in Bi, whilethe synergistic action of Ostwald ripening and collision coagulation of drops yielda huge amount of large-size drops rich in Bi gathering in the lower part of the solidifying alloy, thus aggravates the macro segregation of the solidified monotectic alloy.

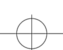
KEY WORDS metallic materials, Al-Bi monotctic alloy, alloy composition, solidification microstructure, gravity migration

* 国家自然科学基金51401133, 辽宁省科学技术基金20141074, 辽宁省教育厅科学研究项目L2014230和沈阳建筑大学学科涵育项目XKHY2-48资助。

2016年4月24日收到初稿; 2016年5月14日收到修改稿。

本文联系人: 康智强

DOI: 10.11901/1005.3093.2016.227



匀质Al-Bi合金是汽车工业潜在的优良轴瓦材料，该类金属制品具有较低的摩擦系数，在滑动时显现了易滑动的特性[1,2]。但该类合金在凝固过程须经过两液相共存的难混溶区，在此区间单相液态熔体将分解成液态富Bi相和液态富Al相，富Bi相液滴除受到形核、扩散长大、重力迁移和碰撞凝并等复杂因素的影响外，还受到合金成分、冷却速率等因素的影响，因而采用传统铸造方法很难制备出具有工业应用价值的匀质Al-Bi偏晶合金[3-6]。研究偏晶合金难混溶区中液-液相分离和分解机制，避免或抑制第二相液滴的粗化和分离过程，是制备匀质偏晶合金的重要内容。本文采用数值模拟与实验相结合的方法，研究常规条件下Al-Bi偏晶合金难混溶区中液-液相分离和分解机制，分析Bi含量对富Bi相的粗化和分离过程的影响，实验结果和模拟结果对比，验证所建立的数学模型及采用方法的准确性。

1 实验方法

用电子天平对纯度为99.99%的金属Al和Bi按照合金名义成分(质量分数)Al-3.4%Bi、Al-5%Bi、Al-10%Bi进行称重，将称量好的合金原料放在石墨坩埚内加热熔化并升温至1000℃后保温处理10 min，保温过程中充分搅拌合金以形成均匀熔体；然后，在常规重力条件下将在空气中自然冷却至不同温度的合金试样进行淬火实验；最后，将获得的半径为3.9 mm，高为42 mm的柱状试样沿纵向抛开，抛光后，采用扫描电子显微镜(SEM)对纵向剖面上、中、下三个部位分别取三个点进行显微组织观测，应用图像分析软件进行定量金相分析。由于是对冷却至不同温度的试样逐一进行难混溶区的液淬操作，记录各试样的淬火时间、温度及顺序，逐一观察合金试样的显微组织，从而分析偏晶合金凝固显微组织的演变过程，考察富Bi相含量对富Bi相粒子的平均直径、数量密度以及尺寸分布的影响。

2 结果与讨论

2.1 Bi含量对Al-Bi偏晶合金显微组织演变的影响

图1显示了不同成分Al-Bi合金在常规重力条件下，逐一冷却至不同温度进行淬火实验后的合金显微组织，图中黑色的Al基体相上分布着不同尺寸的白色富Bi相粒子。对比分析图1a和b可见，凝固温度从T_1降至T_2过程中，成分为Al-3.4%Bi合金试样显微组织中均无大尺寸富Bi液滴生成，且富Bi相沿试样纵向基本均匀分布在基体相中。如图1c和d所示，成分为Al-5%Bi过偏晶合金的显微组织由富Bi液滴细小而均匀分布的组织演化为粗大而不均匀分布，凝固温度为T_2时所获得的Al-5%Bi合金显微组织中富Bi液滴的尺寸、数量以及所占面积分数与凝固温度为T_1时相比明显增大。与前两种成分的Al-Bi合金显微组织相比，在凝固温度为T_1时，Al-10%Bi过偏晶合金的显微组织中就出现了较大尺寸的富Bi液滴，如图1e所示；在凝固温度为T_2时所获得的显微组织(图1f)中富Bi液滴的尺寸、数量和密度与凝固温度为T_1时的合金显微组织相比显著增大。由此说明，成分为Al-5%Bi和Al-10%Bi的过偏晶合金存在液-液相难混溶区，其凝固过程受到多种影响因素的作用，富Bi相含量的增加促使多种影响因素的作用加强，液滴的尺寸、液滴的数量和体积分数沿试样径向显著增加，液滴初始

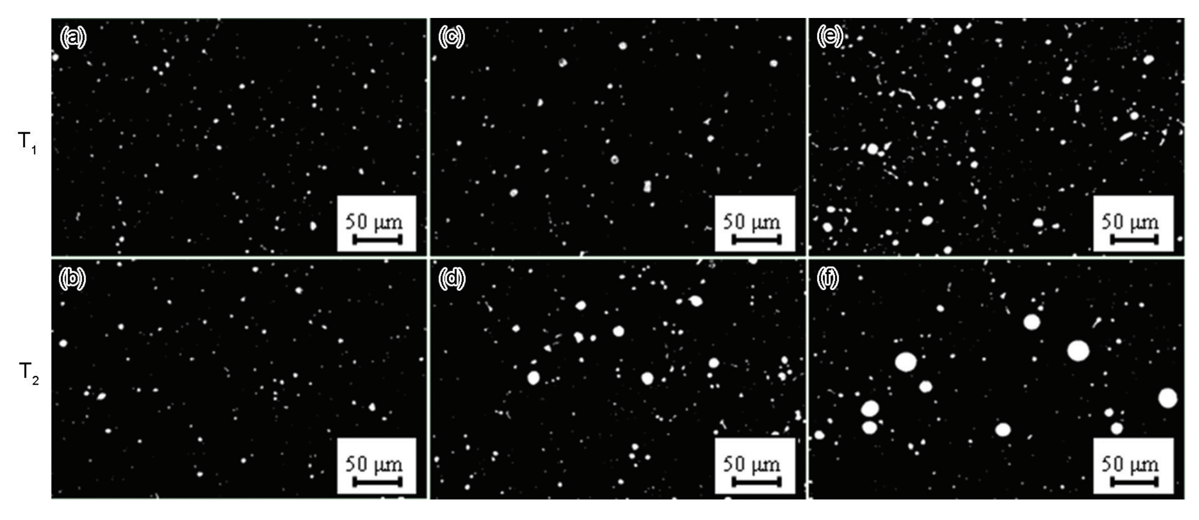


图1 不同成分的Al-Bi合金试样中部显微组织演变

Fig.1 Microstructure evolution of Al-Bi alloys in the middle of sample with Al-3.4%Bi, Al-5%Bi and Al-10%Bi during solidification process (a) Al-3.4%Bi, T_1=766℃, (c) Al-5%Bi, T_1=766℃, (e) Al-10%Bi, T_1=766℃, (b) Al-3.4%Bi, T_2=749℃, (d) Al-5%Bi, T_2=749℃, (f) Al-10%Bi, T_2=749℃

阶段扩散长大和凝固后期重力沉降及碰撞凝并作用明显增强。

2.2 Bi含量对显微组织中富Bi液滴尺寸分布的影响

经过定量金相分析后, 统计出的700℃时三种成分的Al-Bi偏晶合金上、下部位显微组织中富Bi液滴的直径满足正态分布, 且在相同试样尺寸及凝固条件下, 三种不同成分的合金显微组织中富Bi液滴分布的概率密度最大值对应的液滴直径范围区间均为2~8 μm, 如图2所示。由此说明, 合金试样尺寸和冷却速率对合金显微组织存在一定影响。由图2可见, 随着Bi含量的增加, 在不同部位所选取的上、中、下三点的富Bi液滴的尺寸分布范围沿试样纵向变宽, 液滴概率密度减小, 尤其是合金试样下部组织中的富Bi液滴的直径分布范围更宽、概率密度更小, 最大概率密度对应的液滴平均直径越大; 随着Bi含量的增加, Al-Bi合金凝固显微组织中富Bi液滴的尺寸沿试样径向的变化不大。由此说明, 富Bi相含量越高, 合金显微组织的均匀性沿重力方向变差, 试样下部富Bi液滴的重力沉降和碰撞凝并的作用越严重, 大量的大尺寸富Bi液滴的聚集容易造成显微组织的宏观偏析, 甚至发生分层现象。

2.3 Bi含量对显微组织中富Bi液滴平均直径和密度的影响

在相同凝固温度下, 随着Bi含量的增加, 富Bi液滴的平均直径呈对数增大, 且增加速率逐渐变缓, 富Bi液滴密度也逐渐增大, 沿试样纵向的不同部位合金显微组织中富Bi液滴的平均直径差距和密度差异逐渐增大, 不同成分的合金显微组织中富Bi液滴的密度和平均直径沿试样径向并无明显变化。如图3a所示, 成分为Al-10%Bi合金试样下部组织中富Bi液滴的平均直径为5.01 mm, 比试样上部组织中富Bi液滴的平均直径4.34 mm增大了15.4%, 成分为Al-5%Bi合金试样下部组织中富Bi液滴的平均直径为4.43 mm, 比试样上部组织中富Bi液滴的平均直径增加了9.8%, 且合金成分为Al-10%Bi合金试样下部组织中富Bi液滴的平均直径是Al-5%Bi和Al-3.4%Bi合金试样下部组织中富Bi液滴平均直径的1.1倍和1.3倍。由此可见, Bi含量的高低对富Bi液滴尺寸的影响很大。从图3b可见, 成分为Al-3.4%Bi和Al-5%Bi的合金试样上部液滴密度均大于试样下部液滴密度, 且随着Bi含量的增加, 试样中部的液滴密度由与下部情况接近演变为与上部情况接近; 而成分为Al-10%Bi的合

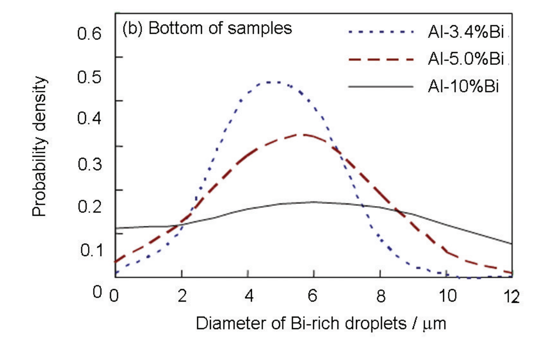
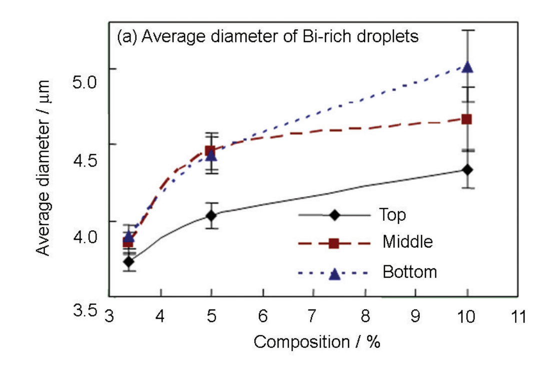


图2 不同成分的Al-Bi合金700℃淬火组织中富Bi液滴尺寸分布

Fig.2 Distribution of the Bi-rich droplets in the top (a) and bottom (b) of the Al-Bi alloy samples with different composition quenched at 700℃



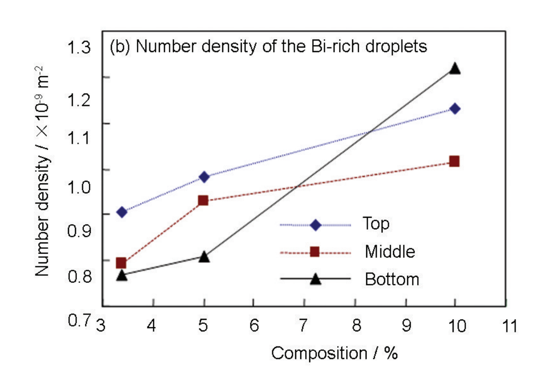
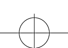


图3 Al-Bi合金700℃淬火组织中富Bi液滴平均直径和液滴密度随合金成分的变化

Fig.3 (a) Average diameter and (b)number density of the Bi-rich droplets in the top, middle and bottom of the Al-Bi alloy samples with different composition quenched at 700℃



金试样下部的液滴密度明显大于其他部位的液滴密度。分析可知, 随着Bi含量的增加, 富Bi液滴的尺寸和数量均沿试样纵向逐渐增大, 沿试样径向无明显变化。试样下部因重力迁移增加的液滴数量逐渐大于该部位因Ostwald熟化和碰撞凝并作用减少的液滴数量, 因而导致Bi较高成分合金试样下部具有更大的液滴密度。

3 常规条件下偏晶合金凝固过程的模拟

3.1 偏晶合金显微组织演变的数学模型

当偏晶合金单一相熔体冷却至难混溶区时, 将发生液-液相分解 $L \rightarrow L_1+L_2$, 即 L_2 相液滴开始形核, 其中 L_1 相为基体相, L_2 相为富Bi相。根据形核理论将晶核的形成分为匀质形核和异质形核。匀质形核需要很大的过冷度, 而异质形核在较小的过冷度下就可发生, 且异质形核理论对于工程金属更具有实际意义[7-9]。本文采用Rappaz[10]提出的异质连续形核模型, 液滴形核密度的变化可用连续的而非离散的分布函数 $\mathrm{d}n/\mathrm{d}\Delta T$ 来描述, 且液滴密度的变化满足高斯正态分布, 并根据守恒方程建立液滴的密度方程, 即

$$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{d}\Delta T} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi}\cdot \Delta T_\sigma}\cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T-\Delta T_N}{\Delta T_\sigma}\right)^2\right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_2\rho_2 n)+\nabla\cdot(f_2\rho_2 U_2 n)=f_2\rho_2 N \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, n 为液滴密度; ΔT 为 L_2 相形核所需过冷度, 可由 $\Delta T=T_b-T_1+m(c_1-c_0)$, 其中 T_b 为组元互溶温度, m 为液相线斜率, c_0 为初始熔体溶质浓度, c_1 为远离液-液界面处的 L_1 相远场浓度; $n_{\max}$ 为最大液滴密度; ΔT_σ 为高斯分布标准偏差; ΔT_N 为最大液滴形核速率所需的过冷度; f_2 为 L_2 相体积分数; ρ_2 为 L_2 相密度; U_2 为 L_2 相的运动速度; t 为凝固时间; N 为形核速率, 令 $N=(\mathrm{d}n/d\Delta T)\cdot(d\Delta T/dt)$。

L_2 相液滴形核后, 当熔体过饱和度($\Delta c=c_1-c_1^*$)较大时, 熔体中所有尺寸的富Bi液滴都处于过饱和状态, 所有富Bi液滴都将通过扩散方式进行长大; 当熔体过饱和度较小时, 较大的液滴仍处于过饱和状态, 但较小的液滴则处于未饱和状态, 因而, 在较大的液滴进行扩散长大的同时, 较小的液滴则不断溶解。随着时间的增加, 液滴的平均半径增加而液滴的数量减小, 即发生了Ostwald熟化过程[11]。采用Zener[12]模型求解过饱和基体中液滴的长大, 并根据物理化学理论将Ostwald熟化机制[11]考虑其中, 可推导出液滴界面移动速度为

$$v=\frac{dr}{dt}=\frac{D_1}{r}\cdot\frac{c_1^*-c_1}{c_1^*-c_2}\left(\Delta c-\frac{\alpha}{r}\right) \quad (3)$$

公式(3)中, v 为 L_2 相液滴界面生长速率; c_1^* 为界面处 L_1 相的平衡浓度; c_2 为来 L_2 相体积平均浓度; r 为液滴半径, 可由公式 $r=d_2/2=(6f_2/\pi\cdot n)^{1/3}$ 计算得出; $D_1=D_0\cdot T_1^2$ 为溶质扩散系数; $\alpha=2\sigma^* V_2/RT_1$, σ^* 为界面张力, V_2 为液滴摩尔体积, R 为普适气体常数。由方程(3)可知, 具有一定过饱和度的基体存在着一个临界液滴尺寸 $r^*=\alpha/\Delta c$。半径 $r>r^*$ 的液滴扩散长大, 进行 L_1 相中的溶质向 L_2 相液滴迁移的扩散长大过程; 半径 $r<r^*$ 的液滴溶解, 进行小液滴内的溶质向大液滴迁移的Ostwald熟化过程。

3.2 偏晶合金凝固过程数值分析

本文采用计算流体力学(CFD)商业软件和以上建立的数学模型在合金尺寸及冷却条件相同的条件下, 分别对成分为Al-5%Bi合金和Al-10%Bi合金实现偏晶合金难混溶区凝固过程的数值分析。在保证模拟结果稳定可靠的前提下, 对数值模拟过程中所建立的几何模型, 网格划分以及数值模拟计算的整个过程进行简化。所建立的模型尺寸为 $90\times90\ \mathrm{mm}^2$, 四周采用第二类边界条件, 对流换热系数为 $750\ \mathrm{W/(m^2\cdot k)}$, 环境温度为290 K。数值分析过程中综合考虑了凝固过程中两液相间传热、传质、传动量及溶质传输现象, 这四种传输现象由用户采用UDF编程实现。所建立的数学模型不考虑凝固收缩, 且两相的粘度相同, 并假设单个液滴内扩散为无穷。

如图4a和b所示, 合金成分为Al-5%Bi的偏晶合金试样中 L_2 相液滴的体积分数最大值为0.20%, 而成分为Al-10%Bi的偏晶合金的 L_2 相体积分数最大值达到了2.56%, 相当于成分为Al-5%Bi合金试样中 L_2 相体积分数的12.8倍。由此可见, 随着Bi含量的增加, L_2 相液滴的体积分数显著增大且试样上部与下部之间的 L_2 相体积分数相差较大。如图4c所示, 整个Al-5%Bi合金试样中 L_2 相液滴的平均直径较小, 最大值仅为13.7 μm, 且液滴直径分布的范围较窄, 试样上部、下部 L_2 相液滴平均直径差距不大。相比之下, 成分为Al-10%Bi的偏晶合金试样中 L_2 相液滴的平均直径分布范围较宽, 且尺寸较大的液滴大多聚集在试样底部(图4b)。结合图4b和d可见, Bi含量的增加导致 L_2 相液滴的尺寸分布范围变宽, 大量较大尺寸液滴聚集在合金试样下部, Al-10%Bi合金试样显微组织的均匀性较差。分析可知, 随着Bi含量的增加, 液-液相分离和分解的作用时间延

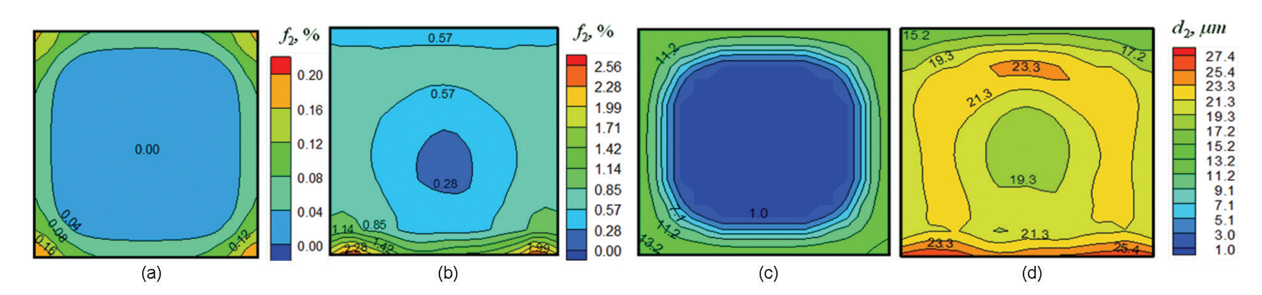


图 4 凝固后期的 L_2 相液滴体积分数分布和直径分布

Fig.4 Volume fraction distribution and diameter distribution of the L_2 phase near the solidification end of Al-5%Bi and Al-10%Bi alloys (a) L_2 phase volume fraction distribution of Al-5%Bi, f_{2max}=0.20%, (b) L_2 phase volume fraction distribution of Al-10%Bi, f_{2max}=2.56%, (c) L_2 phase diameter distribution of Al-5%Bi, d_{2max}=13.7 μm, (d) L_2 phase diameter distribution of Al-10%Bi, d_{2max}=27.4 μm

长, 液滴受到的重力迁移、Ostwald 熟化和碰撞凝并的作用均显著增强, 导致富 Bi 相含量较高的合金试样的显微组织的均匀性较差。由此说明, 合金中 L_2 相组元含量越少, 越易于得到 L_2 相液滴均匀而细小地分布于基体中的合金组织。此外, 凝固后期, Al-5%Bi 合金试样中 L_2 相液滴密度的最大值 1508 mm^{-3} 小于 Al-10%Bi 合金试样中 L_2 相液滴密度的最大值, 说明 L_2 相液滴密度随合金成分的增加而增大。由此可见, 较低的 Bi 含量有利于偏晶合金显微组织的均匀分布。

通过对比 Al-5%Bi 和 Al-10%Bi 合金难混溶区凝固过程的模拟结果可以发现, 随着 Bi 含量减小, 合金试样的冷却速率逐渐增大, 温度梯度和过冷度逐渐减小, 导致形核速率下降, 使 L_2 相液滴密度逐渐减小。富 Bi 相含量的降低使难混溶温度区间变窄, 重力作用程度减弱, 流动速度减缓, L_2 相液滴的扩散长大和 Ostwald 熟化速度减慢, L_2 相液滴的尺寸减小, 以及 L_2 相液滴密度的减小, 抑制碰撞凝并。由此可见, Bi 成分较低的合金试样在难混溶区凝固过程中液-液相分离和分解行为比较平缓。此外, 将实验结果(图 3)与模拟结果(图 4)进行对比分析, 两者均表明富 Bi 液滴的平均尺寸和体积分数随着 Bi 含量的增加而增大, 且试样下部增大的幅度大于上部和中部, 两者在定量和定性上具有较好的一致性, 验证了所建立的数学模型及模拟结果的准确性。

4 结　论

1. 在相同凝固条件下, 成分为 Al-10%Bi 合金试样下部显微组织中富 Bi 液滴的平均直径和体积分数分别是成分为 Al-5%Bi 合金试样下部显微组织中富 Bi 液滴平均直径和体积分数的 1.1 倍和 12.8 倍, 且随着 Bi 含量的增加, 试样上部与下部组织中富 Bi 液滴平均直径差距和体积分数差距均逐渐增加, 较高的 Bi 含量不利于获得弥散型偏晶合金显微组织。

2. Bi 含量的增加液滴受到重力迁移、Ostwald 熟化和碰撞凝并作用均显著增强, 合金试样下部因重力迁移导致的液滴数量的增加逐渐大于因 Ostwald 熟化和碰撞凝并作用减少的液滴数量, 因而使试样下部聚集大量的大尺寸富 Bi 液滴, 加重合金的成分偏析。

3. 数值模拟结果和实验测定结果对比分析, 均表明合金试样中富 Bi 液滴的平均直径和体积分数随着 Bi 含量的增加而不断增大, 且试样下部增大的幅度较大, 两者在定量和定性上具有较好的一致性, 验证了所建立的数学模型及模拟结果的准确性。

参 考 文 献

1 ZHANG Lin, WANG Engang, ZUO Xiaowei, Effect of magnetic field on liquid-liquid separationof Cu-Pb-La hypermonotecticalloy, Rare Metal Material and Engineering, **44**(2), 344(2015)
(张　林, 王恩刚, 左小伟, 磁场对 Cu-Pb-La 过偏晶合金液-液分离的作用, 稀有金属材料与工程, **44**(2), 344(2015))

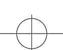
2 ZHAO Jingyun, LIU Lanqing, Effect of Directional solidification rate on solidified structure of Al- Bi monotectic composition alloy and computer analysis , Foundry Tecnology, **36**(4), 994(2015)
(赵敬云, 刘兰青, 定向凝固速度对 Al-Bi 偏晶点成分合金凝固组织的影响及计算机分析, 铸造技术, **36**(4), 994(2015))

3 KANG Zhiqiang, WANG Engang, ZHANG Lin, Simulation and Analysis of Liquid- Liquid Separation Mechanism of Hypermonotectic Al-Bi Alloy, Journal of Northeastern University(Natural Science), **31**(9), 1262(2010)
(康智强, 王恩刚, 张　林, Al-Bi 过偏晶合金液-液相分离模拟与分析, 东北大学学报(自然科学版), **31**(9), 1262(2010))

4 Shu C, Zhao J Z, Jiang H X, Microstructure evolution of a ternary monotectic alloy during directional solidification, ActaMetall, **28**(3), 316(2015)

5 LI Haili, ZHAO Jiuzhou, Solidification of Al- Pbmonotectic alloy under a static magnetic field, Acta Metallurgica Sinica, **41**(1), 81 (2001)
(李海丽, 赵九洲, 磁场作用下 Al-Pb 偏晶合金的凝固过程, 金属学报, **41**(1), 81(2001))

6 LI Haili, ZHAO Jiuzhou, Modelling and simulation of the micro-



structure formation in a strip cast Al-Pb alloy, Acta Metallurgica Sinica, **46**(6), 695(2010)
(李海丽, 赵九洲, Al-Pb 偏晶合金连续凝固过程模拟, 金属学报, **46**(6), 695(2010))

7 YANG Youcai, FU Zuoxin, SHEN Yue, Model for Solidification Microstructure Simulation of Ag-Cu Alloy, Precious Metals, **33**(4), 33(2012)
(杨有才, 付作鑫, 沈 月, Ag-Cu 合金凝固微观组织模拟数学模型, 贵金属, **33**(4), 33(2012))

8 ZOU Qinghua, Thermal Physical Properties of Materials withNon-homogenous Nucleation of Liquid Drop, Basic Sciences Journal of Textile Universities, **9**(3), 82(1996)
(邹庆化, 材料液滴非均匀形核时的热物理特性, 纺织高校基础科学学报, **9**(3), 82(1996))

9 HUANG Linjun, CHAO Huiling, LIU Yue, Research progresses of nucleation theory of crystals, Materials Review, **28**(15), 17(2014)
(黄林军, 曹慧玲, 刘 悦, 等, 晶体形核理论的研究进展, 材料导报, **28**(15), 17(2014))

10 Thévoz P, Desbiolles J L, Rappaz M. Modeling of equiaxed microstructure formation in casting, Metallurgical and Materials Transactions A, **20A**(2), 311(1989)

11 ZHAO Jiuzhou, Zn - Pbmonotectic alloy liquid separation mechanism and the solidification behavior, PhD Thesis (Harbin, Harbin Institute of Technology, 1994)
(赵九洲, Zn-Pb 偏晶合金液相分离机制及凝固行为, 博士学位论文 (哈尔滨, 哈尔滨工业大学)1994)

12 Ratke L, Diefenbach S, Liquid immiscible alloys, Materials Science and Engineering R: Reports, **15**(7-8), 263(1995)